Notion 8

Moteurs asynchrones (triphasés et monophasés) : principes, circuit équivalent, analyse, démarrage et variateurs de vitesse.

[Électrotechnique Wildi : chapitres 1, 33, 34, 35, 38]

1

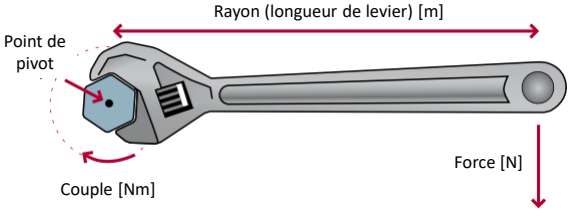
Notions de base :

1.5 **Force** : $\boxed{F = 9{,}8\ m}$

où : F = force de gravité (ou pesanteur), en newtons [N]
m = masse, en kilogramme [kg]
$9{,}8$ = accélération due à la gravité [m/s²]

1.6 **Couple** : $\boxed{T = Fr}$

où : T = couple, en newton-mètres [N·m]
F = force, en newtons [N]
r = rayon, en mètres [m]



1.7 **Travail** : $\boxed{W = Fd}$

où : W = travail, en joules [J]
F = force, en newtons [N]
d = longueur du déplacement, en mètre [m]

Source : Wildi

2

Notions de base :

1.8 Puissance : $P = \frac{W}{t}$

Puissance moteur : $1\ hp = 746\ W$

où : P = puissance, en watts [W]
W = travail effectué, en joules [J]
t = temps, en secondes [s]

1.9 Puissance d'un moteur : $P = \omega \mathrm{T}$

où : P = puissance mécanique, en watts [W]
ω = vitesse angulaire, en radians par seconde $[rad/s]$
T = couple, en newton-mètres [N·m]

$P = \frac{nT}{9{,}55}$ $\quad n = 9{,}55\frac{60}{\omega}$

où : P = puissance mécanique, en watts [W]
T = couple, en newton-mètres [N·m]
n = vitesse de rotation, en révolution par minute $[r/min]$

Source : Wildi

Notions de base :

1.10 Énergie dans les corps en mouvement :

$$W = \frac{1}{2}mv^2$$

où : W = énergie cinétique, en joules [J]
m = masse, en kilogramme [kg]
v = vitesse, en mètre par seconde $[m/s]$

$$W = \frac{1}{2}J\omega^2$$

où : W = énergie cinétique, en joules [J]
J = moment d'inertie, en kilogramme-mètre carré [kg·m²]
ω = vitesse de rotation, en radians par seconde $[rad/s]$

$$W = 5{,}48 \times 10^{-3} J n^2$$

où : W = énergie cinétique, en joules [J]
J = moment d'inertie, en kilogramme-mètre carré [kg·m²]
n = vitesse de rotation, en tours par minute $[r/min]$
$5{,}48 \times 10^{-3}$ = facteur tenant compte des unités [valeur exacte = (π)²/1800]

Énergie dans une inductance:

$$W = \frac{1}{2}LI^2$$

où : W = énergie emmagasinée dans une bobine [J]
L = inductance de la bobine [H]
I = courant dans la bobine [A]

Énergie dans un condensateur:

$$W = \frac{1}{2}CE^2$$

où : W = énergie emmagasinée dans un condensateur [J]
C = capacité du condensateur [H]
E = tension aux bornes du condensateur [V]

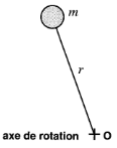
Source : Wildi

Notions de base :

Formules du moment d'inertie J autour d'un axe de rotation:

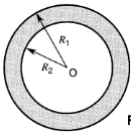
Masse m à une distance r de l'axe o :

$$J = mr^2$$



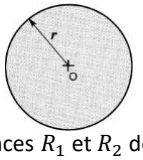
Anneau rectangulaire de masse m et de rayons R_1 et R_2 :

$$J = \frac{m(R_1^2 + R_2^2)}{2}$$



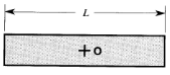
Disque solide de masse m et de rayon r :

$$J = \frac{mr^2}{2}$$



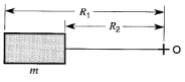
Barre uniforme de masse m et de longueur r :

$$J = \frac{mL^2}{12}$$



Barre homogène de masse m à des distances R_1 et R_2 de l'axe :

$$J = \frac{m}{3}(R_1^2 + R_2^2 + R_1R_2)$$

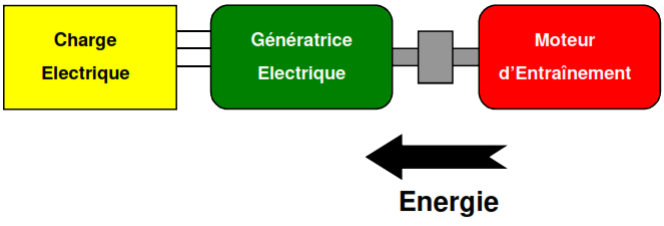


Source : Wildi

Notions de base :

Génératrice électrique entraînée par un moteur:

- Le moteur fournit l'énergie mécanique à la génératrice
- La génératrice transforme l'énergie mécanique en énergie électrique
- L'énergie électrique est dissipée dans la charge électrique

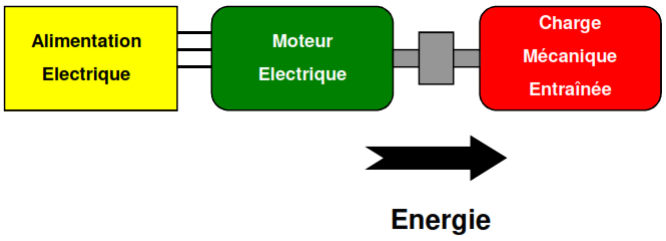


Source : notes A. Chebak

Notions de base :

Charge mécanique entraînée par un moteur électrique:

- Le moteur prélève de l'énergie électrique de l'alimentation
- Le moteur transforme l'énergie électrique en énergie mécanique
- L'énergie mécanique est dissipée dans la charge mécanique entraînée



Source : notes A. Chebak

Notions de base :

1.18 Couple, inertie et variation de vitesse:

Pour changer la vitesse de rotation d'un corps, il faut lui appliquer un couple. Plus ce couple est élevé, plus la vitesse augmente rapidement.

$$\Delta n = \frac{9{,}55 T \Delta t}{J}$$

où : Δn = variation de vitesse, en tours par minute [r/min]
T = couple en newton-mètre [N·m]
Δt = temps d'application du couple, en seconde [s]
J = moment d'inertie, en kilogramme-mètre carré [kg·m²]
$9{,}55$ = facteur d'unité [valeur exacte = 30/π]

Source : Wildi

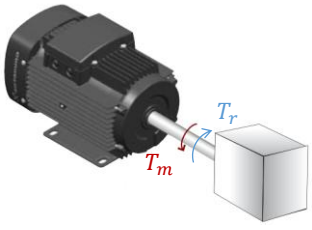
Notions de base :

1.19 Vitesse de rotation et charge d'un moteur:

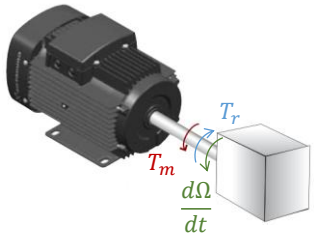
Lorsqu'un moteur électrique entraîne une charge mécanique, on a un système régit par trois facteurs :

- le couple instantané développé par le moteur T_m
- le couple exercé par la charge ou le couple résistant instantanée T_r
- la vitesse de rotation instantanée n ou Ω

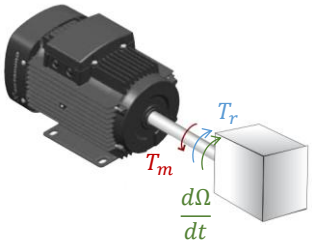
$$T_m - T_r = J \cdot \frac{d\Omega}{dt}$$



$T_m = T_r$ la vitesse Ω est constante, l'accélération $d\Omega/dt$est nulle



$T_m > T_r$ la vitesse Ω augmente, l'accélération $d\Omega/dt$est positive



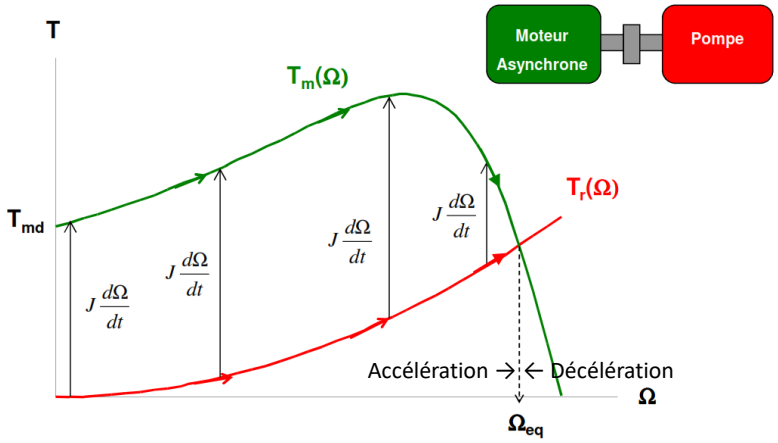
$T_m < T_r$ la vitesse Ω diminue, l'accélération $d\Omega/dt$est négative

Source : Wildi

Notions de base :

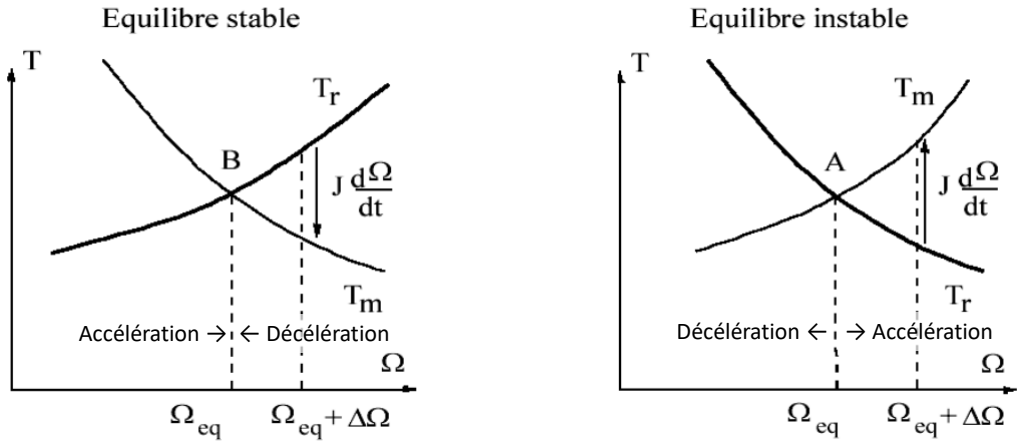
1.19 Vitesse de rotation et charge d'un moteur:

Exemple des courbes de couple d'un moteur asynchrone et d'une pompe:



Source : notes A. Chebak

Stabilité du point d'équilibre d'un entraînement



Source : notes A. Chebak

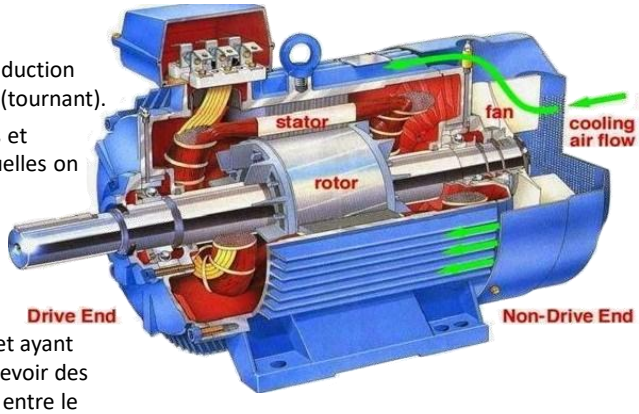
Moteurs asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 33]

33.1 Parties principales

Le moteur asynchrone triphasé (parfois appelé moteur d'induction triphasé) comprend deux parties: le stator (fixe) et le rotor (tournant).

La *stator* est un cylindre creux fait de tôles d'acier empilées et contenant des encoches dans la paroi intérieure dans lesquelles on loge un bobinage triphasé.



Le *rotor* est un cylindre plein fait de tôles d'acier empilées et ayant des encoches dans sa périphérie extérieure destinées à recevoir des conducteurs. Selon la qualité de construction la séparation entre le stator et le rotor (entrefer) est de l'ordre de 0,2 à 2 mm. Il existe deux types de rotors : le très populaire *rotor à cage d'écureuil* et le *rotor bobiné*.

Source : Wildi

Moteurs asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 33]

33.1 Parties principales – les laminations et tôles

Le *stator* est un cylindre creux fait de tôles d'acier empilées et contenant des encoches dans la paroi intérieure dans lesquelles on loge un bobinage triphasé.

Les tôles empilées sont maintenues ensembles par des rivets ou des cordons de soudure effectués avant l'insertion des bobinages. Une fois assemblé et bobiné, le stator est inséré dans un bâti fait d'acier ou d'aluminium coulé ou de tôle d'acier ou acier inoxydable soudée.

Source : Wildi

Moteurs asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 33]

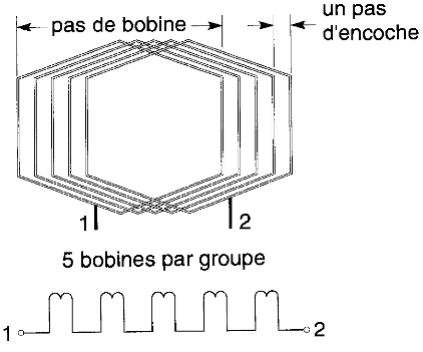
Les bobinages triphasés

Presque tous les moteurs triphasés utilisent les enroulements imbriqués. Un enroulement imbriqué est composé de groupes de bobines distribués uniformément à la périphérie du stator.

Le nombre de groupes est donné par l'expression : $nombre\ de\ groupes = nombre\ de\ pôles \times nombre\ de\ phases$

Le nombre de phase étant de 3, un moteur à 4 pôles aura donc $4 \times 3 = 12\ groupes$. Le nombre de bobines ne peut pas être inférieur au nombre de groupes. Le moteur triphasé à 4 pôles doit posséder au moins 12 bobines.

Dans un enroulement imbriqué le nombre de bobines est égal au nombre d'encoches. Dans l'exemple précédent, le moteur doit avoir 12 encoches. Toutefois, il est préférable d'employer 2 bobines ou plus par groupe pour amélioré le couple lors du démarrage , tout en réduisant le bruit lorsque le moteur atteint sa vitesse de régime permanent. Les bobine d'un même groupe sont raccordées en série et elles sont réparties dans les encoches successives. Les bobines sont identiques et peuvent contenir plusieurs spires. La largeur d'une bobine s'appelle « pas de la bobine » ou « pas de bobinage ».



Source : Wildi

Moteurs asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 33]

La distance entre deux pôles adjacents s'appelle le *pas polaire*. Le pas polaire peut s'exprimer en arc de cercle, en degré ou en nombre d'encoches.

Soit un stator ayant 12 pôles, 72 encoches et un diamètre intérieur de 200 mm, le pas polaire sera :

$$pas\ polaire = \frac{\pi \cdot d}{pôles} = \frac{\pi \times 200}{12} = 52{,}3\ mm$$

$$pas\ polaire = \frac{360}{pôles} = \frac{360}{12} = 30°$$

$$pas\ polaire = \frac{nombre\ d'encoches}{nombre\ de\ pôles} = \frac{72}{12} = 6\ encoches$$

Il s'ensuit qu'un pas polaire s'étend de l'encoche 1 à 7. Le pas de bobine est habituellement compris entre 80 % et 100 % du pas polaire. L'utilisation d'un pas inférieur à 100 % permet d'améliorer la distribution de flux tournant et de diminuer la quantité de cuivre requis.

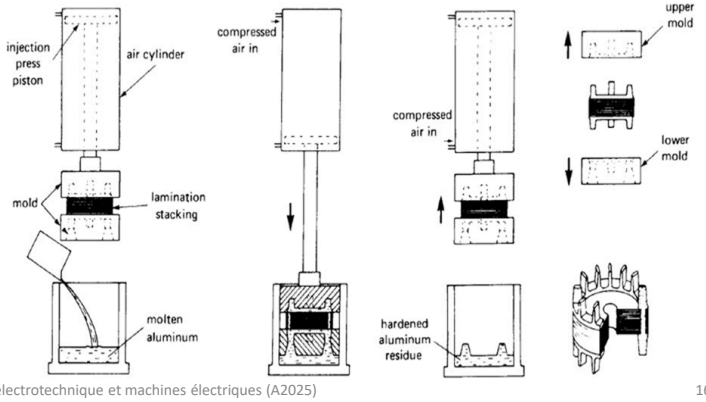
Source : Wildi

Moteurs asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 33]

L'enroulement du *rotor à cage d'écureuil* est constitué de barres de cuivre nues introduites dans les encoches; ces barres sont soudées à chaque extrémité à deux anneaux qui les court-circuitent. L'ensemble ressemble à une cage d'écureuil d'où le nom de rotor à cage d'écureuil, ou simplement *rotor à cage*.

Dans les moteurs de petite et moyenne puissance, les barres et les anneaux sont formés d'un seul bloc d'aluminium coulé.



Source : Wildi

Moteurs asynchrones triphasés

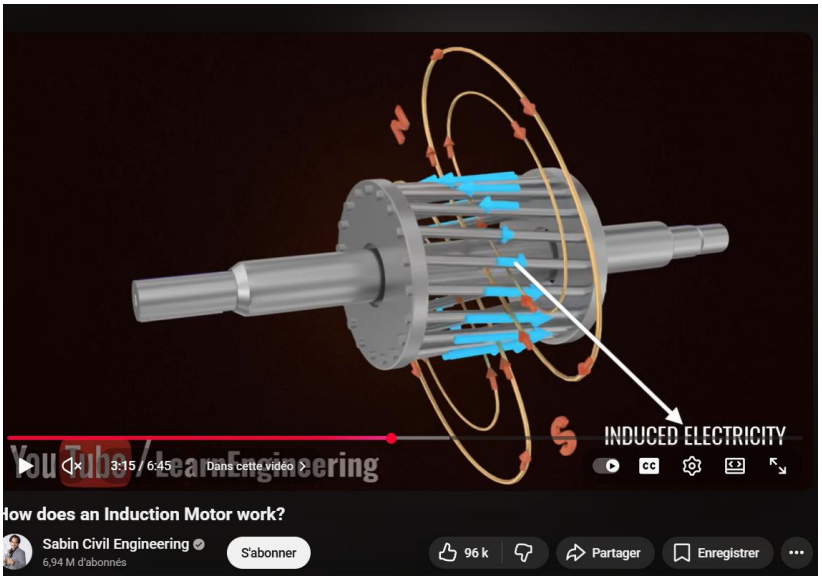
[Wildi : Chapitre 33]

Le *rotor bobiné* comprend un bobinage triphasé, semblable à celui du stator, placé dans les encoches. Il est composé de trois enroulements raccordés en étoile; l'extrémité libre de chaque enroulement est reliée à une bague tournant avec l'arbre. Ces bagues permettent, par l'intermédiaire de trois ou quatre balais, d'insérer une résistance extérieure en série avec chacun des trois enroulements lors du démarrage du moteur. En fonctionnement normal, les trois balais sont court-circuités.

Source : Wildi

Vidéo d'une machine à induction

https://www.youtube.com/watch?v=AQqyGNOP_3o



Moteurs asynchrones triphasés

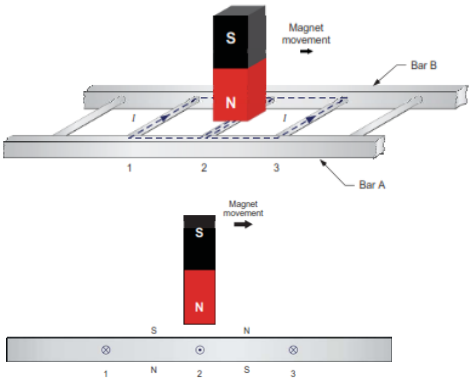
[Wildi : Chapitre 33]

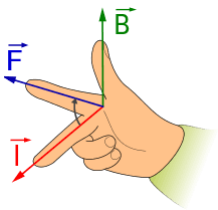
33.2 Principe de fonctionnement du moteur asynchrone

Le fonctionnement du moteur asynchrone triphasé est basé sur l'application des principes I, II et III de l'électromagnétisme. On peut le comprendre à l'aide de l'exemple suivant.

Soit une série de conducteurs de longueur l dont les extrémités sont court-circuitées par deux barres conductrices A et B. Un aimant permanent se déplace rapidement au-dessus de cette « échelle » vers la droite à une vitesse v, de sorte que son champ magnétique B coupe les conducteurs à tour de rôle.

(III) Une tension $\boldsymbol{E = Blv}$ est induite dans chacun des conducteurs coupés par le champ. Puisque les conducteurs sont court-circuités par les barres, un courant se met à circuler dans les conducteurs au moment ou l'aimant passe au-dessus. Ce courant I traversant le champ magnétique exerce une force $\boldsymbol{F = BlI}$ sur le conducteur dans la direction du déplacement de l'aimant.





Source : Wildi

19

Moteurs asynchrones triphasés

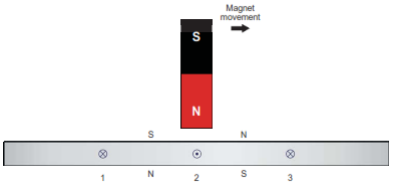
[Wildi : Chapitre 33]

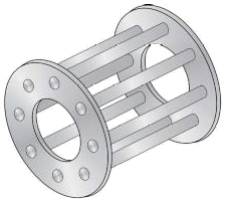
Si « l'échelle » de conducteurs était libre de se déplacer, elle accélérerait dans la direction du déplacement de l'aimant. Cependant, à mesure qu'elle gagne de la vitesse, la vitesse v de coupure du champ B par les conducteurs se fait moins rapidement et la tension induite diminue, de même que le courant I.

Donc la force F diminue aussi. Si la vitesse de « l'échelle » égale la vitesse de déplacement de l'aimant, la force sera nulle.

Pour maintenir une force suffisante au déplacement de « l'échelle », la vitesse de cette dernière doit être inférieure à celle de l'aimant.

Dans le moteur asynchrone, l'échelle est recourbée sur elle-même pour former une cage d'écureuil et l'aimant est remplacé par un champ tournant qui coupe les conducteurs du rotor.





Source : Wildi

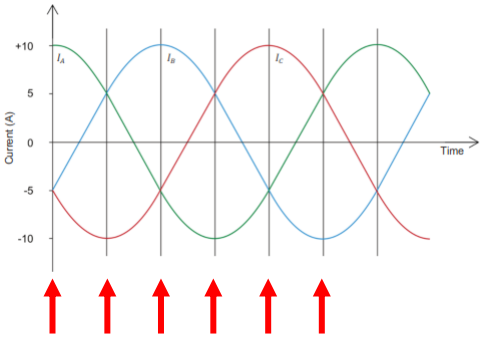
20

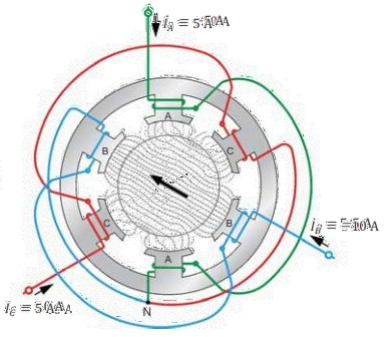
Moteurs asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 33]

33.3 Champ tournant

Soit un stator comportant 6 pôles saillant et bobiné avec trois phases disposées à 120° l'une de l'autre. En alimentant ces phases avec une tension triphasée, les champs magnétiques créés par les courants dans chaque phase se combinent pour obtenir un champ tournant dans le temps.



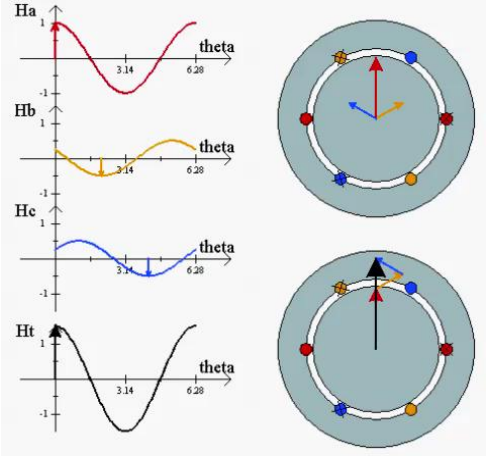


Source : Wildi

Moteurs asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 33]

33.3 Champ tournant

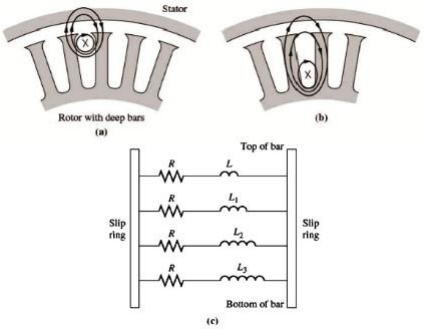


Source : Wildi

Moteurs asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 33]

Dans le cas du rotor avec des conducteurs en profondeur, la partie près de la surface du rotor (a) présente une réactance relativement faible contrairement à la partie en profondeur du conducteur (b) qui est dans un milieu très perméable magnétiquement et présente une haute réactance.



33.4 Sens de rotation

Le sens de rotation du champ tournant est défini par l'ordre des maximums de tension soit A-B-C. Le champ tourne alors dans le sens horaire. On change le sens de rotation en intervertissant deux des trois phases pour obtenir A-C-B donnant ainsi une rotation antihoraire.

Source : Wildi

Moteurs asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 33]

33.5 Nombre de pôles – vitesse synchrone

La vitesse synchrone de rotation du champ tournant est donnée par :

$$n_s = \frac{120f}{p}$$

où f = fréquence de la tension induite [Hz]
p = nombre de pôles du rotor
n_s = vitesse synchrone du champ tournant [r/min]

Source : Wildi

Moteurs asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 33]

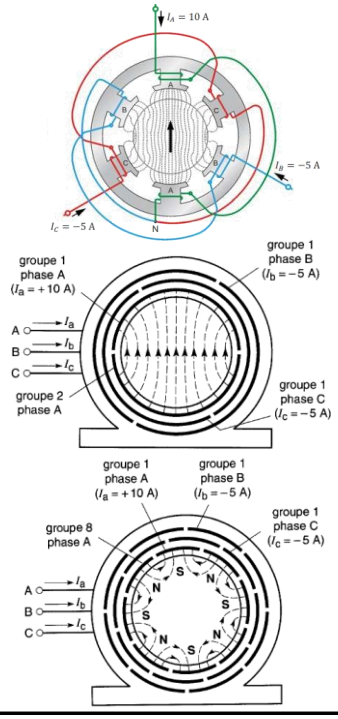
33.5 Nombre de pôles – vitesse synchrone

Contrairement aux stators des anciennes machines ayant des pôles saillants, les stators modernes sont lisses. Lorsque les enroulements d'un stator sont arrangés pour former 2 pôles par phase (6 pôles en tout), on obtient un champ tournant bipolaire. En disposant plusieurs groupes de pôles sur le stator, on obtient un spectre magnétique multipolaire. Une machine triphasée ayant 8 groupes par phase (24 pôles) est appelée machine à 8 pôles.

Pour une même fréquence d'alimentation, la vitesse de rotation d'un champ multipolaire est inférieure à celle d'un champ bipolaire. La vitesse synchrone de rotation du champ tournant est donnée par :

$$n_s = \frac{120f}{p} = \frac{60f}{p'}$$

où f = fréquence de la tension induite [Hz]
p = nombre de pôles du stator par phase
p' = nombre de paires de pôles par phase
n_s = vitesse synchrone du champ tournant [r/min]



Source : Wildi

Moteurs asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 33]

Exemple 33-1

Un moteur asynchrone possédant 20 pôles par phase est alimenté par une source triphasée à 50 Hz. Calculer la vitesse synchrone.

$$n_S = \frac{120\,f}{p} = \frac{120 \times 50}{20} = 300\ RPM$$

Source : Wildi

Moteurs asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 33]

33.6 Démarrage du moteur à cage d'écureuil

Au démarrage :

1. les tensions d'un système triphasé appliquées au stator d'un moteur asynchrone y produisent des courants triphasés;
2. les courants produisent un champ tournant (principe I vu à la notion 6);
3. le champ tournant induit une tension dans les barres du rotor (principe III vu à la notion 6);
4. la tension induite donne naissance à des courants intenses dans les barres;
5. les barres portant un courant, et situées dans un champ magnétique, sont soumises à des forces électromagnétiques (principe II vu à la notion 6);
6. les forces tendent à entraîner le rotor dans le sens de rotation du champ.

Source : Wildi

Moteurs asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 33]

33.7 Accélération du rotor et glissement

Après le démarrage, le rotor accélère et le rapport de vitesse avec le champ tournant diminue. La fréquence relative étant plus basse, la tension induite décroit ainsi que le courant et la force exercée sur le rotor. Pour maintenir une force suffisante pour entrainer le rotor et vaincre le frottement, la vitesse du rotor doit être légèrement inférieure à la vitesse synchrone. À vide, la différence de vitesse entre le rotor et le champ tournant est moins de 0,1% de la vitesse synchrone. On dit que le *glissement* est de 0,1%.

33.8 Moteur en charge

En charge, le glissement sera plus élevé. Il a 0,5% pour les gros moteurs et jusqu'à 3% pour les petits moteurs selon leur construction.

33.9 Glissement et vitesse de glissement

La vitesse de glissement est donnée par : $\boxed{n_g = n_s - n}$

La valeur du glissement est donnée par : $\boxed{s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{n_g}{n_s}}$

où s = glissement
n_s = vitesse synchrone [r/min]
n = vitesse du rotor [r/min]
n_g = vitesse de glissement [r/min]

Source : Wildi

Moteurs asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 33]

Exemple 33-2

Un moteur asynchrone à 6 pôles par phase est alimenté par une source triphasée à 60 Hz. En charge, il tourne à une vitesse de 1140 PRM. Calculer sa vitesse de glissement et son glissement.

Solution

Vitesse synchrone du moteur : $n_S = \frac{120\,f}{p} = \frac{120 \times 60}{6} = 1200\ RPM$

Vitesse de glissement : $n_g = n_s - n = 1200 - 1140 = 60\ RPM$

Glissement : $s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{n_g}{n_s} = \frac{60}{1200} = 0.05\ ou\ 5\ \%$

Source : Wildi

Moteurs asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 33]

33.10 Glissement et fréquence induites dans le rotor

La tension et la fréquence induites dans le rotor dépendent du glissement: $\boxed{f_2 = sf}$ et $\boxed{E_2 = sE_{co}}$

où f_2 = fréquence dans le rotor [Hz]
n = fréquence du réseau alimentant le stator [Hz]
s = glissement
E_2 = tension induite dans le rotor à circuit ouvert [V]
E_{co} = tension induite dans le rotor à circuit ouvert, le rotor étant immobile [V]

Dans un rotor à cage, la tension E_{co} à circuit ouvert est celle qu'on obtiendrait aux bornes des barres si elles étaient déconnectées des anneaux. Dans le cas d'un rotor bobiné, elle est égale à $1/\sqrt{3}$ de la tension mesurée aux bornes des bagues à circuit ouvert.

Source : Wildi

Moteurs asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 33]

Exemple 33-3

Un moteur asynchrone possédant 6 pôles est alimenté par une source triphasée de 60 Hz. Calculer la fréquence du courant dans le rotor dans les conditions suivantes :

a) Rotor bloqué (à l'arrêt)
b) Rotor tournant à 500 RPM dans le même sens que le champ tournant
c) Rotor tournant à 500 RPM dans le sens inverse que le champ tournant
d) Rotor tournant à 2000 RPM dans le même sens que le champ tournant

Solution : La vitesse synchrone du moteur est de ***1200 RPM***

a) À l'arrêt, la vitesse du moteur est nulle, par conséquent le glissement est : $s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1200 - 0}{1200} = 1$

La fréquence de la tension et du courant induits dans le rotor est : $f_2 = sf = 1 \times 60 = 60\ Hz$

Source : Wildi

Moteurs asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 33]

Exemple 33-3

b) Lorsque le moteur tourne dans le même sens que le champ, la vitesse n du moteur est considérée comme positive. Le glissement est : $s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1200 - 500}{1200} = 0.583$

La fréquence de la tension et du courant induits dans le rotor est :

$$f_2 = sf = 0.583 \times 60 = 34.98 \approx 35\ Hz$$

c) Lorsque le moteur tourne dans le sens inverse du champ, la vitesse n du moteur est considérée comme négative. Le glissement est : $s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1200 - (-500)}{1200} = 1.417$

La fréquence de la tension et du courant induits dans le rotor est :

$$f_2 = sf = 1.417 \times 60 = 85.02 \approx 85\ Hz$$

Source : Wildi

Moteurs asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 33]

Exemple 33-3

b) Lorsque le moteur tourne à 2000 RPM dans le même sens que le champ, la vitesse n du moteur est toujours positive. Le glissement est :

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1200 - 2000}{1200} = -0.667$$

Un glissement négatif indique que le moteur fonctionne comme génératrice. La fréquence de la tension et du courant induits dans le rotor est :

$$f_2 = sf = -0.667 \times 60 = -40.02 \approx 40\ Hz$$

Source : Wildi

Moteurs asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 33]

Exemple 33-4

Soit un moteur asynchrone triphasé de 500 hp, 2300 V, 890 RPM.

a) Exprimer la puissance du moteur en kilowatts.

b) Calculer la vitesse approximative du courant de pleine charge, du courant à vide et du courant de démarrage.

c) Faire une estimation de la puissance apparente tirée par le moteur au moment du démarrage, sous pleine tension.

d) Calculer la valeur approximative du couple lorsque le rotor est bloqué.

Solution :

a) La puissance indiquée d'un moteur est toujours celle que le moteur développe mécaniquement. La puissance du 500 hp correspond à $500 \times 746 = 373\ kW$, ce qui le place dans la catégorie des moteurs de grande puissance. Les caractéristiques nominales des moteurs de cette catégorie sont :

- Rendement : 0.93
- Facteur de puissance : 0.87
- Coefficient du courant à vide : 0.3
- Coefficient du couple à rotor bloqué : 0.5 à 1
- Coefficient du courant à rotor bloqué : 4 à 6

Moteurs asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 33]

Exemple 33-4

b) La puissance active tirée de la ligne : $P = 373\ kW/rendement = 373/0.93 = 401\ kW$

Puissance apparente tirée de la ligne : $S = 401\ kW/FP = 401/0.87 = 461\ kVA$

Puissance réactive tirée de la ligne : $Q = \sqrt{461^2 - 401^2} = 277\ kVAR$

Courant de pleine charge : $I = S/(E\sqrt{3}) = 641000/(2300\sqrt{3}) = 116\ A$

Courant à vide = $116 \times 0.3 = 35\ A$

Courant à rotor bloqué = $116 \times (4\text{ à }6) = 464\ A\text{ à }696\ A$ selon le design

c) Puissance apparente lorsque le rotor est bloqué : $S = 2300\sqrt{3} \times (464\ A\text{ à }696\ A) = 1.8\text{ à }2.8\ MVA$

d) Couple de pleine charge : $T = \dfrac{9.55\ P}{n} = \dfrac{9.55 \times 373000}{890} = 4\ kN \cdot m$

Couple à rotor bloqué : $T_{bloqué} = 4\ kN \cdot m \times (0.5\text{ à }1.0) = 2\text{ à }4\ kN \cdot m$ selon le design

Moteurs asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 33]

33.13 Cheminement de la puissance active

Pour mieux comprendre la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique, il faut suivre le cheminement de la puissance active absorbé par le moteur à la figure suivante:

1. **Rendement**

$$rendement\ (\eta) = \frac{P_{mc}}{P_e}$$

2. **Pertes Joule dans le rotor**

$$P_{jr} = sP_r$$

3. **Puissance mécanique**

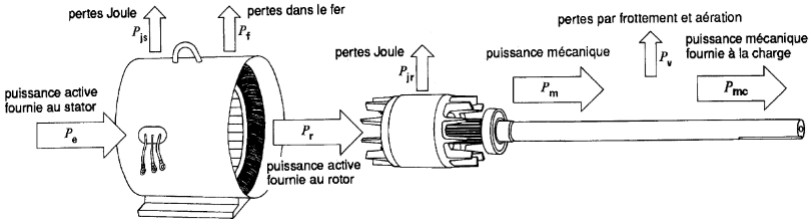
$$P_m = P_r - P_{jr} = P_r - sP_r$$

$$P_m = P_r(1 - s)$$

P_f= pertes fer

P_{js} = pertes Joule dans le stator [W]

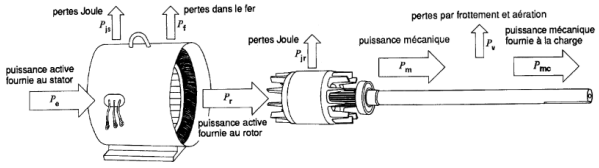
où P_{mc} = puissance mécanique fournie à la charge [W]
P_e = puissance électrique fournie au moteur [W]
P_{jr} = pertes Joules dans le rotor [W]
s = glissement
P_r = puissance transmise au rotor [W]
P_m = puissance mécanique développé par le moteur [W]
P_v = pertes par frottement et aération [W]



Source : Wildi

Moteurs asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 33]



33.13 Cheminement de la puissance active

4. Couple moteur

Le couple développé par le moteur est donné par : $T = \dfrac{9{,}55P_m}{n}$

En substituant dans cette équation les expressions du glissement et de la puissance mécanique, on obtient :

$$T = \frac{9{,}55P_r(1-s)}{n_s(1-s)} = \frac{9{,}55P_r}{n_s}$$

donc $\boxed{T = \dfrac{9{,}55P_r}{n_s}}$

où T = couple, en newton-mètre [N·m]
P_r = puissance transmise au rotor, en watts [W]
n_s = vitesse synchrone, en tours par minute [r/min]
$9{,}55$ = facteur tenant compte des unités [valeur exacte $30/\pi$]

Source : Wildi

Moteurs asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 33]

Exemple 33-5

Un moteur asynchrone triphasé à 4 pôles ayant une puissance nominale de 100 hp (75 kW) est alimenté par une ligne a 600 V, 60 Hz. Deux wattmètres placés dans les fils de ligne indiquent une puissance totale de 70 kW et un ampèremètre indique un courant de ligne de 78 A. Des mesures précises indiquent une vitesse de rotation de 1763 RPM. De plus, on fournit l'information suivante :

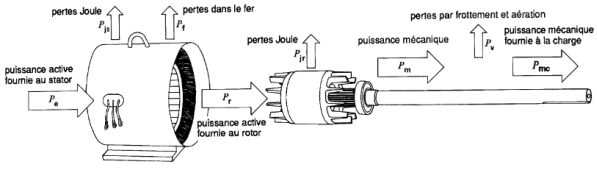
Perte dans le fer $= 2\ kW$

Perte par ventilation et friction $= 1.2\ kW$

Résistance entre deux bornes du stator $= 0.34\Omega$

Calculer :

a) La puissance active Pr fournie au rotor
b) Les pertes Joule dans le rotor
c) La puissance mécanique fournie à la charge, en hp
d) Le rendement du moteur
e) Le couple développé par le moteur



Source : Wildi

Moteurs asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 33]

Exemple 33-5 Solution

a) Puissance fournie au stator : $P_e = 70\ kW$

Résistance du stator par phase (on suppose une connexion en étoile) : $R = 0.34 \div 2 = 0.17\ \Omega$

Pertes Joules dans le stator : $P_{js} = 3\ RI^2 = 3 \times 0.17 \times (78)^2 = 3.1\ kW$

Pertes dans le fer : $P_f = 2\ kW$

Puissance fournie au rotor : $P_r = P_e - P_{js} - P_f = (70 - 3.1 - 2) = 64.9\ kW$

b) Glissement : $s = \dfrac{n_s - n}{n_s} = \dfrac{1800 - 1763}{1800} = 0.0206$

Pertes joule dans le rotor : $P_{js} = sP_r = 0.020 \times 64.9 = 1.3\ kW$

c) Puissance mécanique interne P_m : $P_m = P_r - P_{jr} = 64.9 - 1.3 = 63.6\ kW$

Puissance mécanique P_{mc} fournie à la charge : $P_{mc} = P_m - P_v = 63.6 - 1.2 = 62.4\ kW$

Puissance mécanique exprimée en horsepower : $P_{mc} = \dfrac{62400}{746} = 83.6\ hp$

Source : Wildi

Moteurs asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 33]

Exemple 33-5 Solution

d) Le rendement du moteur : $\eta = \dfrac{P_{mc}}{P_e} = \dfrac{62.4}{70} = 0.89\ ou\ 89\%$

e) Couple interne développé par le moteur : $T = \dfrac{9{,}55P_r}{n_s} = \dfrac{9.55 \times 64900}{1800} = 344\ N \cdot m$

Couple qui entraîne la charge : $T_{mc} = \dfrac{9{,}55P_{mc}}{n} = \dfrac{9.55 \times 62400}{1763} = 338\ N \cdot m$

Source : Wildi

Moteurs asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 33]

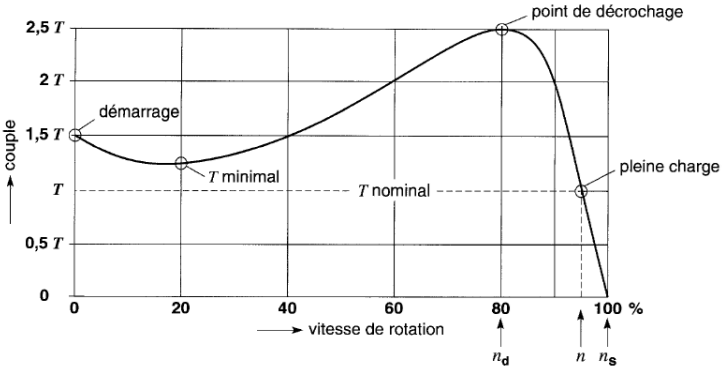
33.14 Courbes du couple en fonction de la vitesse

Soit un moteur à cage, alimenté par une source triphasée dont la tension et la fréquence sont fixes. À mesure qu'on augmente la charge mécanique, la vitesse baisse progressivement. Cependant, lorsque le couple atteint la vitesse critique appelé point de décrochage, la vitesse chute subitement et le moteur s'arrête.

Si T désigne la valeur du couple de pleine charge, le couple de démarrage vaut $1{,}5\ T$. À mesure que la vitesse croît, le couple diminue jusqu'à un minimum avant d'augmenter de nouveau.

Il atteint une valeur maximale de $2{,}5\ T$ à $80\ \%$ de la vitesse synchrone.

Passé ce point, le couple diminue, tandis que la vitesse continue à augmenter pour atteindre un point d'opération (T, n) de pleine charge.



Source : Wildi

Moteurs asynchrones triphasés

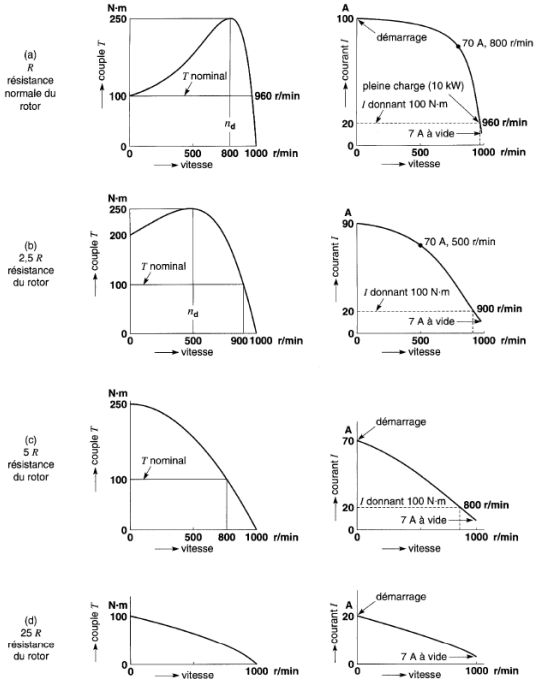
[Wildi : Chapitre 33]

33.15 Effet de la résistance du rotor

La forme de la courbe de couple dépend de la résistance des conducteurs du rotor.

TABLEAU 33-2 RÉSISTANCE DU ROTOR

condition		R	2,5 R	5 R	25 R
à vide					
courant	(A)	7	7	7	7
à pleine charge (T = 100 N·m)					
courant	(A)	20	20	20	20
couple	(N·m)	100	100	100	100
vitesse	(r/min)	960	900	800	0
au démarrage					
courant	(A)	100	90	70	20
couple	(N·m)	100	200	250	100



Source : Wildi

Moteurs asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 33]

33.15 Effet de la résistance du rotor (suite)

34.3 Classification selon les caractéristiques électriques et mécaniques

La résistance des conducteurs du rotor dépend de la géométrie de ceux-ci dans les encoches du rotor.

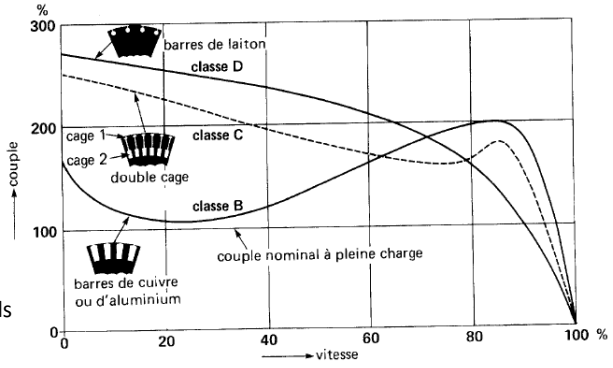
Ces géométries sont standardisées par classe selon la codification NEMA (National Electrical Manufacturers Association). Il existe aussi une codification CEI (*IEC*).

Parmi les classes les plus courantes, on retrouve :

Classe B : Moteurs à couple de démarrage normal

Classe C : Moteurs à couple de démarrage élevé

Classe D : Moteurs à glissement élevé



En plus de classement des rotors, NEMA a défini des standards au sujet des dimensions des moteurs, des classes d'isolation des conducteurs du stator, etc.

Source : Wildi

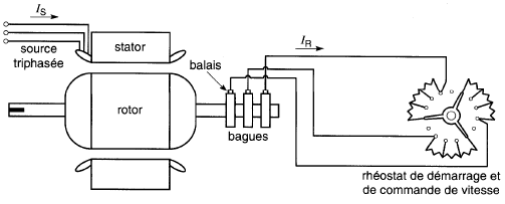
Moteurs asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 33]

33.16 Moteur à rotor bobiné ou moteur à bagues

Bien qu'il soit possible de choisir les caractéristiques de la courbe de couple selon une classe de rotor, il n'est toutefois pas possible de les changer en fonctionnement. Il est possible d'obtenir une certaine flexibilité en optant pour un moteur à *rotor bobiné* aussi appelé *moteur à bagues*. Bien que plus coûteux que le moteur à cage, il offre, les avantages suivants:

1. son courant de démarrage est moins élevé que celui d'un moteur à cage lorsqu'on intercale trois résistances extérieures dans l'enroulement triphasé du rotor.
2. son couple de démarrage est alors supérieur à celui du moteur à cage ordinaire
3. sa vitesse peut être réglée au moyen de résistances externes



Source : Wildi

Moteurs asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 33]

Problèmes :

33-15 à 33-19, 33-23 à 33-24

Source : Wildi

Applications des machines asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 34]

34.1 Standardisation et classification de moteurs asynchrones

Tous les moteurs industriels de puissance inférieure à 500 HP ont des carcasses dont les dimensions importantes ont été standardisées par les organismes de normalisation (NEMA, CSA en Amérique du Nord et IEC ailleurs). La standardisation ne couvre pas seulement l'aspect mécanique; elle dicte également les exigences minimales en ce qui concerne les caractéristiques électriques des moteurs. Ainsi, les moteurs doivent satisfaire aux valeurs limites établies pour le couple de démarrage, le courant de démarrage, la capacité de surcharge, l'échauffement et les normes de sécurité.

Source : Wildi

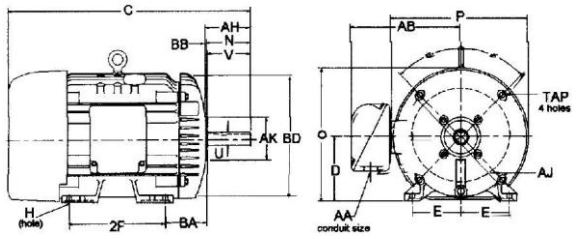
Applications des machines asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 34]

34.1 Standardisation et classification de moteurs asynchrones

Dimensions de châssis NEMA MG 1 – 4.03

Fr-Frame = Numéro selon NEMA en référence avec les dimensions mécaniques du bâti du moteur. Cette information assure l'interchangeabilité mécanique des moteurs pour les dimensions de montage et d'arbre.



FRAME	D	E	2F	H	N*	O*	P*	U	V	AA	AB*	AH	AJ	AK
42	2-5/8	1-3/4	1-11/16	9/32 SLOT	1-1/2	5	4-11/16	3/8	1-1/8	3/8	4-1/32	1-5/16	3-3/4	3
48	3	2-1/8	2-3/4	11/32 SLOT	1-7/8	5-7/8	5-11/16	½	1-1/2	1/2	4-3/8	1-11/16	3-3/4	3
56 56H	3-1/2	2-7/16	3 5	11/32 SLOT	2-7/16 2-1/8	6-7/8	6-5/8	5/8	1-7/8	1/2	5	2-1/16	5-7/8	4-1/2
143T 145T	3-1/2	2-3/4	4 5	11/32	2-1/2	6-7/8	6-5/8	7/8	2-1/4	3/4	5-1/4	2-1/8	5-7/8	4-1/2
182 184 182T 184T	4-1/2	3-3/4	4-1/2 5-1/2 4-1/2 5-1/2	13/32	2-11/16 2-11/16 3-9/16 3-9/16	8-11/16	7-7/8	7/8 7/8 1-1/8 1-1/8	2-1/4 2-1/4 2-3/4 2-3/4	3-1/4	5-7/8	2-1/8 2-1/8 2-5/8 2-5/8	5-7/8 5-7/8 7-1/4 7-1/4	4-1/2 4-1/4 8-1/2 8-1/2
213 215 213T 215T	5-1/4	4-1/4	5-1/2 7 5-1/2 7	13/32	3-1/2 3-1/2 3-7/8 3-7/8	10-1/4	9-9/16	1-1/8 1-1/8 1-3/8 1-3/8	3 3 3-3/8 3-3/8	3/4	7-3/8	2-3/4 2-3/4 3-1/8 3-1/8	7-1/4	8-1/2

Source : Wildi

Applications des machines asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 34]

34.2 Classification selon les conditions environnements

Dans le type de construction ouvert, l'air est aspiré et circule à l'intérieur du moteur sur le bobinage pour le refroidir avant d'en ressortir.

Protégé contre les gouttes d'eau: les ouvertures de ventilation sont situées de façon à protéger le moteur contre les chutes de gouttes d'eau ou de poussières, jusqu'à 15 ° de la verticale. (Open Drip proof, ODP)

Protégé contre les éclaboussures: les ouvertures de ventilation sont situées de façon à protéger le moteur contre les chutes de gouttes d'eau, de poussières ou de particules solides jusqu'à 100° de la verticale. (Open Splash Proof, OSP)

À ventilation externe: ventilé au moyen d'un système de ventilation actionné par un moteur indépendant. (Open Fan Cooled, OFC)

À canalisation d'air: un conduit d'air peut être fixé aux ouvertures du moteur de façon à réduire la possibilité d'infiltration de pluie, de neige et de particules solides.

Source : Wildi

Applications des machines asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 34]

34.2 Classification selon les conditions environnements

La construction du type fermé ne permet pas l'échange d'air de l'extérieur vers l'intérieur. Il ne peut opérer qu'avec un ventilateur monté directement sur l'arbre. L'air dégagé par l'hélice créera un "champ d'air" qui aidera au refroidissement du moteur.

Fermé ventilé : Un ventilateur est monté sur l'arbre du moteur pour forcer l'air à circuler sur la carcasse. La carcasse de ce moteur est souvent munie d'ailettes pour faciliter l'échange de chaleur. (TEFC: Totally Enclosed Fan Cooled)

Fermé non ventilé : Ce moteur ne possède aucune ventilation et est généralement de faible puissance. Dans certains cas, sa charge peut-être elle même un ventilateur à hélice qui permettra une ventilation supérieure au moteur fermé ventilé. (TEAO : Totally Enclosed Air-Over):

Antidéflagrant: ce moteur supporte des explosions de gaz internes et empêche l'inflammation de gaz externes.(TEEP : Totally Enclosed Explosion Proof)

Protégé contre les poussières inflammables: sa conception exclut l'introduction de poussières inflammables à l'intérieur du moteur.

Source : Wildi

Applications des machines asynchrones triphasés

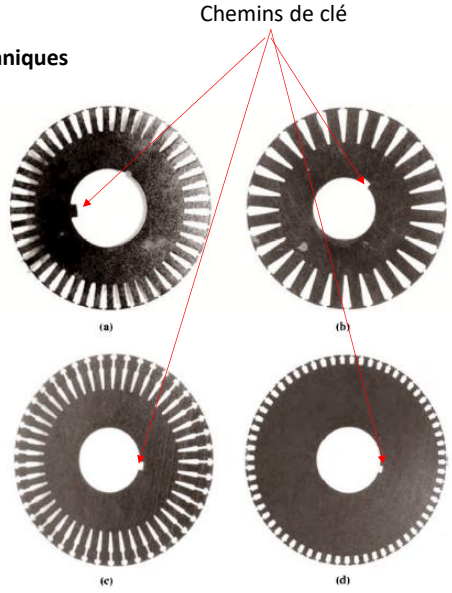
[Wildi : Chapitre 34]

34.3 Classification selon les caractéristiques électriques et mécaniques

Dans le cas des rotors à cage d'écureuil, les encoches renfermement des barres en cuivre ou en aluminium réunies entre elles de part et d'autre du rotor par des anneaux.

Selon la forme des encoches, le moteur offre des caractéristiques de couple et de courant de démarrage différentes. Ces caractéristiques sont divisées selon les classes de construction NEMA suivante :

(a) Classe A NEMA : larges barres près de la surface
(b) Classe B NEMA : larges barres profondes
(c) Classe C NEMA : doubles cages, barres près de la surface et en profondeur
(d) Classe D NEMA : petites barres près de la surface

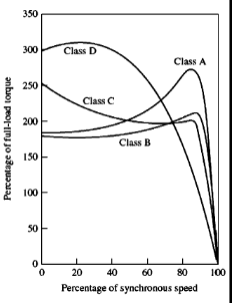


Source : Wildi

Applications des machines asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 34]

34.3 Classification selon les caractéristiques électriques et mécaniques



Classe A NEMA : Moteur à couple et à courant de démarrage normaux

Le couple de démarrage normal (~175%) et relativement élevé (~275%) pour les moteurs à quatre pôles. Le couple maximal est de deux à deux fois et demie le couple de pleine charge. Le glissement en pleine charge est faible. Le courant de démarrage est six à huit fois le courant de pleine charge.

Classe B NEMA : Moteur à couple normal et courant de démarrage faible

Les encoches du rotor d'un moteur de classe B sont allongées et vont plus en profondeur que celles du moteur de classe A. Sensiblement les mêmes caractéristiques de couple que le classe A en charge, mais le courant de démarrage est moindre.

Classe C NEMA : Moteur à couple élevé et à courant de démarrage faible

Le couple de démarrage pour ce moteur à double cage est plus élevé que ceux des moteurs des classes A et B et son courant de démarrage est plus faible. Toutefois, son glissement à pleine charge est légèrement supérieur.

Classe D NEMA : Moteur à couple et à glissement élevés

Son rotor a une forte résistance et est constitué de barres relativement petites et placées en périphérie, ce qui donne un très bon couple de démarrage. Le glissement en charge normale est assez élevé, soit de 5 à 20% suivant l'usage auquel on le destine. C'est le type de moteur qu'on emploie habituellement pour des monte-charges, des presses ou d'autres appareils du genre.

Source : Wildi

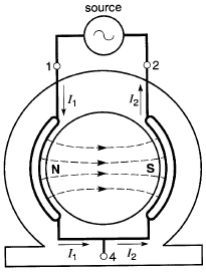
51

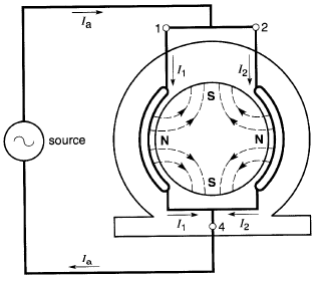
Applications des machines asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 34]

34.6 Moteurs à deux vitesses

On peut bobiner le stator d'un moteur à cage d'écureuil de telle sorte que le moteur tourne à deux vitesses différentes.





Source : Wildi

52

Applications des machines asynchrones triphasés

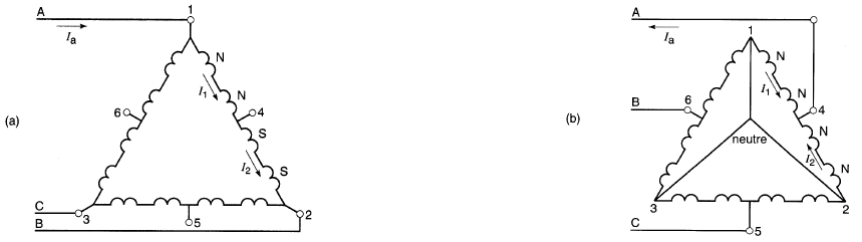
[Wildi : Chapitre 34]

34.6 Moteurs à deux vitesses (suite)

a) Connexions d'un moteur triphasé donnant 4 pôles (haute vitesse)

b) Connexions du même moteur donnant 8 pôles (basse vitesse)

Le moteur développe la même puissance aux deux vitesses.



Source : Wildi

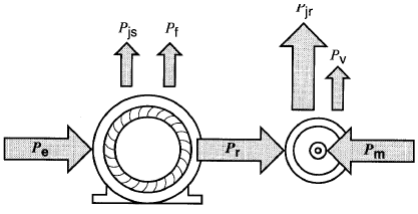
Applications des machines asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 34]

34.7 Moteurs asynchrone fonctionnant comme frein

Certaines autres applications industrielles du moteur asynchrone sont : le freinage, la génératrice et le convertisseur de fréquence. Lorsque l'on désire provoquer un arrêt rapide, on utilise le freinage par inversion du champ tournant en intervertissant deux des trois phases. L'énergie de freinage absorbée est entièrement dissipée en chaleur dans le rotor.

On doit éviter de freiner trop souvent un moteur de cette façon, sinon les températures élevées risquent de détériorer les isolants au stator, et même de faire fondre les barres du rotor.



LÉGENDE

P_e – puissance active fournie au stator
P_{js} – pertes Joule dans le stator
P_f – pertes dans le fer du stator
P_r – puissance active fournie au rotor
P_m – puissance mécanique fournie au rotor
P_{jr} – pertes Joule dans le rotor
P_v – pertes par ventilation et friction dans le rotor

Exemple 34-1

Source : Wildi

Applications des machines asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 34]

34.9 Freinage par courant continu

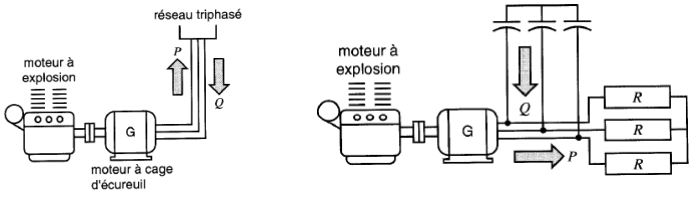
On peut arrêter rapidement un moteur asynchrone et sa charge en faisant circuler un courant continu dans les enroulements du stator. Le freinage par courant continu possède l'avantage de dissiper dans le rotor seulement *le tiers* de l'énergie requise par la méthode par inversion. Le temps de freinage est proportionnel à la valeur du courant continu. Le couple de freinage diminue avec la vitesse de rotation du rotor.

Exemple 34-2

34.15 Moteur asynchrone fonctionnant comme génératrice

Il est possible d'utiliser un moteur synchrone comme génératrice en augmentant la vitesse de rotation du rotor au dessus de la vitesse de rotation du champ tournant (vitesse synchrone) toutefois il faut pouvoir fournir une puissance réactive au stator pour y créer les champs magnétiques nécessaires à l'induction dans le rotor. Peut utilisé.

Exemple 34-3



Source : Wildi

55

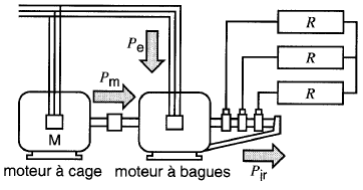
Applications des machines asynchrones triphasés

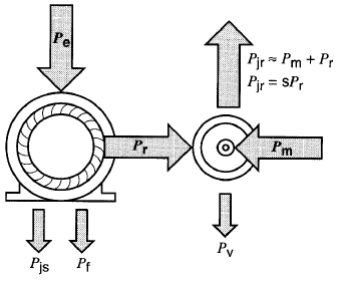
[Wildi : Chapitre 34]

34.16 Convertisseur de fréquence (« obsolète » avec les onduleurs à électronique de puissance)

Une application intéressante du moteur à rotor bobiné est son utilisation comme *convertisseur de fréquence*. Le stator étant alimenté par le réseau et le rotor étant entraîné avec un moteur, la machine à rotor bobiné se comporte alors comme un transformateur rotatif. Le stator est le primaire et le rotor est le secondaire. La différence de vitesses entre le champ tournant et le rotor est la fréquence sortie de ce transformateur.

$$f_r = sf \qquad E = sE_o$$





Exemple 34-4
Exemple 34-5

Source : Wildi

56

Applications des machines asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 34]

34.18 Expression du couple en fonction de la vitesse

Le glissement s, le couple T, la tension d'alimentation E et la résistance du rotor R sont liés par la relation:

$$s = k\frac{TR}{E^2}$$

où k est une constante qui dépend de la construction du moteur.

On peut donc estimer un fonctionnement X selon les specs nominales N:

$$s_X = s_N \left[\frac{T_X}{T_N}\right]\left[\frac{R_X}{R_N}\right]\left[\frac{E_N}{E_X}\right]^2$$

où N = indice spécifiant les conditions de fonctionnement données, lesquelles peuvent correspondre aux indications données sur la plaque signalétique

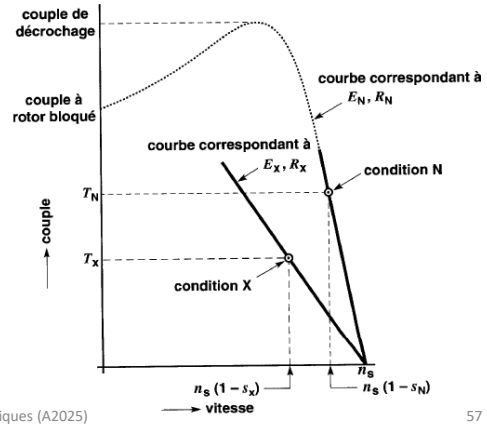
X = indice spécifiant les nouvelles conditions de fonctionnement

S = glissement

T = couple [N·m]

R = résistance du rotor [Ω]

E = tension aux bornes du stator [V]



Exemple 34-6 et 34-7

Source : Wildi

57

Applications des machines asynchrones triphasés

[Wildi : Chapitre 34]

Problèmes

34-11, 34-12, 34-18

Source : Wildi

58

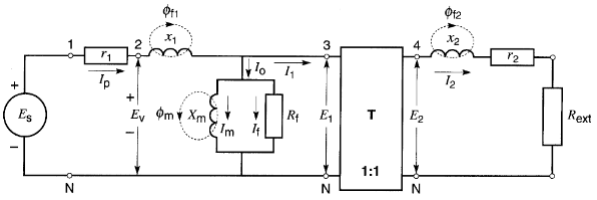
La machine asynchrone : circuit équivalent et variation de la vitesse

[Wildi : Chapitre 35]

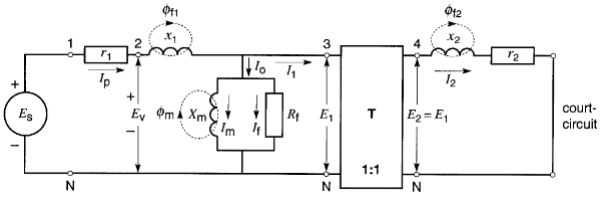
Note: Les prochaines pages (35.1 et 35.2) servent principalement à visualiser les paramètres (ex.: r_1, X_m) utilisés dans des calculs subséquents

35.1 Le moteur à rotor bobiné

La construction d'un moteur à rotor bobiné s'apparente beaucoup à celle d'un transformateur triphasé. À cause de la symétrie des enroulements, il est possible d'en faire l'analyse comme un circuit à transformateur monophasé ayant un rapport de 1:1.



Circuit équivalent avec résistance externe



Circuit équivalent en court-circuit

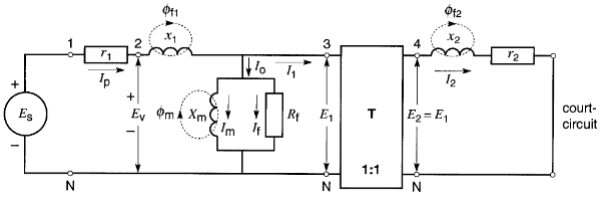
Source : Wildi

59

La machine asynchrone : circuit équivalent et variation de la vitesse

[Wildi : Chapitre 35]

35.1 Le moteur à rotor bobiné (suite)



moteur à rotor bloqué

Les paramètres du circuit sont :

- E_S = tension de la source d'alimentation, ligne-neutre [V]
- r_1 = résistance du stator [Ω]
- r_2 = résistance du rotor [Ω]
- x_1 = réactance du stator [Ω]
- x_2 = réactance du rotor [Ω]
- X_m = réactance de magnétisation [Ω]
- R_f = résistance représentant les pertes dans le fer et par frottement [Ω]
- T = rapport de transformation 1:1
- n_s = vitesse synchrone du moteur [r/min]
- φ_m = flux mutuel dans le moteur [Wb]
- φ_{f1} = flux de fuite du stator [Wb]
- φ_{f2} = flux de fuite du rotor [Wb]
- $\varphi_s = \varphi_{f1} = \varphi_m$ = flux total accroché par le stator [Wb]
- E_1 = tension induite dans le stator par le flux mutuel [V]
- E_2 = tension induite dans le rotor par le flux mutuel [V]
- E_v = tension induite dans le stator par φ_m et φ_{f1} [V]
- f = fréquence de la source [Hz]

Source : Wildi

60

La machine asynchrone : circuit équivalent et variation de la vitesse

[Wildi : Chapitre 35]

35.1 Le moteur à rotor bobiné (suite)

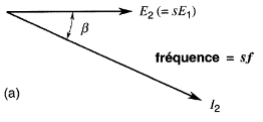
Lorsque le rotor tourne avec un glissement s, la vitesse n du rotor est : $n = n_s(1 - s)$

La tension efficace E_2 au secondaire (rotor) est : $E_2 = sE_1$

Et sa fréquence devient sf, où f est la fréquence de la source. Dons, la réactance de fuite du rotor devient sx_2.

Comme r_2 et sx_2 sont en série, le courant I_2 dans le rotor est donné par : $I_2 = \dfrac{sE_1}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}}$

I_2 est en retard sur $E_2(= sE_1)$ d'un angle β donné par : $\beta = arc\tan\dfrac{sx_2}{r_2}$



Source : Wildi

La machine asynchrone : circuit équivalent et variation de la vitesse

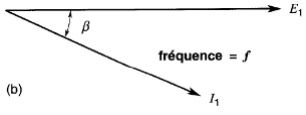
[Wildi : Chapitre 35]

35.1 Le moteur à rotor bobiné (suite)

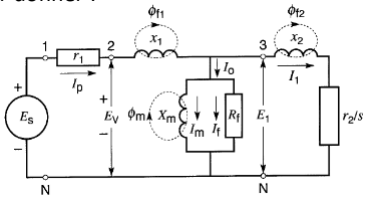
Du fait que le rapport de transformation est 1:1, il est possible de démontrer que :

1. La valeur efficace de I_1 est égale à la valeur efficace de I_2, même si leurs fréquences sont différentes;
2. la valeur efficace de E_2 est égale à la valeur efficace de E_1 multipliée par le glissement s.
3. le déphasage β entre E_1 et I_1 est le même que celui entre E_2 et I_2.

$$I_1 = I_2 = \frac{sE_1}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}} = \frac{E_1}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2}} \quad \text{alors} \quad \frac{E_1}{I_1} = \sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2}$$



On pour alors simplifier de beaucoup pour donner :



Source : Wildi

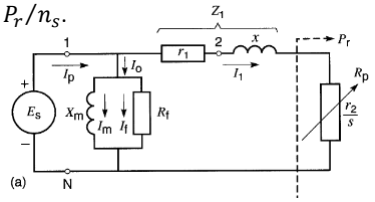
La machine asynchrone : circuit équivalent et variation de la vitesse

[Wildi : Chapitre 35]

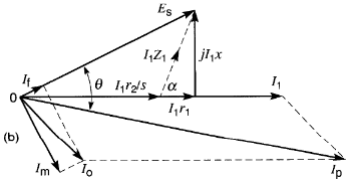
35.1 Le moteur à rotor bobiné (suite)

Pour les moteurs de 2 kW et plus, la branche de magnétisation peut être déplacée aux bornes de l'alimentation. Cela permet de combiner les réactances de fuites x_1 et x_2 en une seule x.

La puissance transmise du stator au rotor est : $P_r = I_1^2\, r_2/s$. Or, cette puissance est proportionnelle au couple T car $T = 9{,}55\ P_r/n_s$.



$$Z_1 = \sqrt{r_1^2 + x^2}$$
$$\alpha = \arctan x/r_1$$



35.2 Diagramme vectoriel d'un moteur asynchrone

Soit le vecteur de référence I_1, on retrouve une chute de tension $I_1 r_1$ et le vecteur $I_1\, r_2/s$ en phase avec I_1. La chute de tension à travers la réactance de fuite x est un vecteur jI_1x qui est en avance de 90° sur I_1. La tension de source E_s est composée de la somme des vecteurs $(I_1 r_1 + I_1\, r_2/s + jI_1 x)$.

Source : Wildi

La machine asynchrone : circuit équivalent et variation de la vitesse

[Wildi : Chapitre 35]

35.3 Puissances électrique, mécanique et thermique

1. puissance active absorbée par le moteur : $P = \dfrac{E_s^2}{R_f} + I_1^2 r_1 + I_1^2\, r_2/s$
2. puissance réactive absorbée par le moteur : $Q = \dfrac{E_s^2}{X_m} + I_1^2 x$
3. puissance apparente absorbée par le moteur : $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$
4. facteur de puissance du moteur : $\cos\theta = \dfrac{P}{S}$
5. courant de ligne : $I_P = \dfrac{S}{E_S}$
6. puissance fournie au rotor : $P_r = I_1^2\, r_2/s$
7. pertes Joule dissipées dans le rotor : $P_{jr} = I_1^2 r_2 = sP_1$
8. puissance mécanique P_{mc} fournie à la charge : $P_{mc} = P_r - P_{jr} = P_r(1-s)$
9. rendement du moteur : $\eta = \dfrac{P_{mc}}{P}$
10. couple du moteur : $T = \dfrac{9{,}55P_{mc}}{n} = \dfrac{9{,}55P_r(1-s)}{n_s(1-s)} = \dfrac{9{,}55P_r}{n_s}$

Source : Wildi

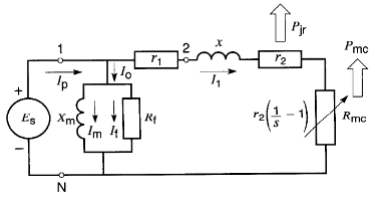
La machine asynchrone : circuit équivalent et variation de la vitesse

[Wildi : Chapitre 35]

35.4 Puissance transmise au rotor et puissance mécanique

La puissance absorbée par la résistance r_2/s correspond à la puissance P_r transmise au rotor. Cette puissance représente la puissance mécanique P_{mc} plus les pertes Joule P_{jr} dissipées dans le rotor. On peut subdiviser la résistance r_2/s en deux composantes : r_2 et R_{mc}

$$R_{mc} = \frac{r_2}{s} - r_2 = r_2\left(\frac{1}{s} - 1\right) \qquad P_{mc} = I_1^2 R_{mc} = I_1^2 r_2\left(\frac{1}{s} - 1\right)$$



Source : Wildi

La machine asynchrone : circuit équivalent et variation de la vitesse

[Wildi : Chapitre 35]

35.5 Couple et vitesse de décrochage et couple de démarrage

La puissance P_r transmise au rotor devient maximale lorsque la résistance r_2/s est égale à ± la valeur de l'impédance de $(r_1 + jx)$ située en amont de r_2/s.

Si $Z_1 = \sqrt{r_1^2 + x^2}$ et le glissement au décrochage est : $\frac{r_2}{s_d} = \pm Z_1$

Alors $\boxed{s_d = +\frac{r_2}{Z_1}}$ (moteur) ou $\boxed{s_d = -\frac{r_2}{Z_1}}$ (génératrice)

Pour les grosses machines, le rapport r_2/Z_1 peut être aussi bas que 0.02 donc un glissement de 2%. On qualifie ces moteurs de moteurs à vitesse constante. Dans le cas d'une petite machine de 200 W, le rapport r_2/Z_1 est de l'ordre de 0.4 (40% de glissement). Le courant de décrochage I_d est alors donnée par :

$$I_d = \frac{E_s}{\sqrt{(r_1 + Z_1)^2 + x^2}} = \frac{E_s}{\sqrt{{r_1}^2 + Z_1^2 + 2r_1Z_1 + x^2}} = \frac{E_s}{\sqrt{2Z_1^2 + 2r_1Z_1}}$$

Source : Wildi

La machine asynchrone : circuit équivalent et variation de la vitesse

[Wildi : Chapitre 35]

35.5 Couple et vitesse de décrochage et couple de démarrage (suite)

Alors $\boxed{I_d = \frac{E_s}{\sqrt{2Z_1(Z_1 + r_1)}}}$ (moteur) ou $\boxed{I_d = \frac{E_s}{\sqrt{2Z_1(Z_1 - r_1)}}}$ (génératrice)

La puissance fournie au rotor lors du décrochage est : $P_r = I_d^2 \frac{r_2}{s_d}$

La valeur du couple de décrochage est :

$\boxed{T_d = \frac{9{,}55E_s^2}{2n_s(r_1 + Z_1)}}$ (moteur) ou $\boxed{T_d = \frac{9{,}55E_s^2}{2n_s(r_1 - Z_1)}}$ (génératrice)

Au démarrage $(s = 1)$:

$\boxed{I_{démarrage} = \frac{E_s}{\sqrt{(r_1 + r_2)^2 + x^2}}}$ $\boxed{T_{démarrage} = \frac{9{,}55r_2}{n_s} I_{démarrage}^2}$

Source : Wildi

Moteurs monophasés

[Wildi : Chapitre 38]

38.1 Construction d'un moteur asynchrone monophasé

Le moteur asynchrone monophasé se compose essentiellement d'un rotor à cage d'écureuil semblable à celui des moteurs triphasés, et d'un stator. Ce dernier porte un enroulement *principal* bobiné de façon à former des pôles dont le nombre détermine la vitesse de la machine. Cet enroulement principal est bobiné avec un fils de fort calibre pouvant faire circuler le courant nominal du moteur. Il porte aussi un enroulement *auxiliaire* qui fonctionne seulement durant la brève période de démarrage. L'enroulement auxiliaire a le même nombre de pôles que l'enroulement principal, mais utilise un fil de plus faible calibre et avec moins de tours.

38.2 Vitesse synchrone

Tout comme pour les moteurs polyphasés (triphasé), la vitesse synchrone d'un moteur asynchrone monophasé est exprimée par :

$\boxed{n_s = \frac{120f}{p}}$ où f = fréquence de la tension induite [Hz]
p = nombre de pôles du rotor
n_s = vitesse synchrone du champ tournant [r/min]

Exemple 38-1

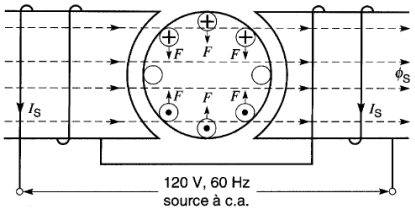
Source : Wildi

Moteurs monophasés

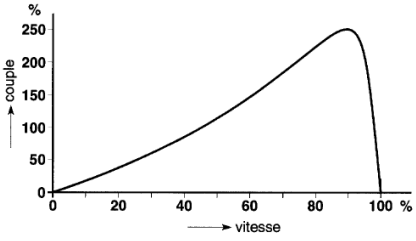
[Wildi : Chapitre 38]

38.3 Couple en fonction de la vitesse

Voici la représentation schématique du rotor au repos et de l'enroulement principal. Un flux φ_S est généré en appliquant une tension à l'enroulement. Ce flux varie alternativement, mais ne produit pas de champ tournant. Le courant produit par la tension induite dans les conducteurs du rotor soumet ces derniers à une force électromagnétique de part et d'autre. Il n'y a pas de couple résultant.



Si le rotor est lancé à la main dans un sens ou l'autre, le rotor produit un couple qui l'accélère dans le même sens du lancement. Le moteur atteint rapidement une vitesse légèrement inférieure à la vitesse synchrone. La courbe du couple en fonction de la vitesse montre que sa valeur maximale est atteinte à environ 75% de la vitesse synchrone.



<u>On doit avoir un moyen d'initier le mouvement pour que le moteur puisse démarrer.</u>

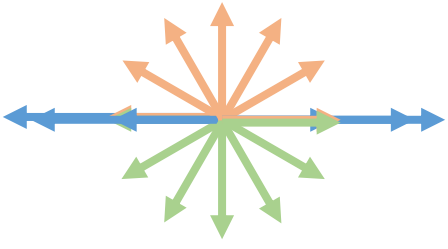
Source : Wildi

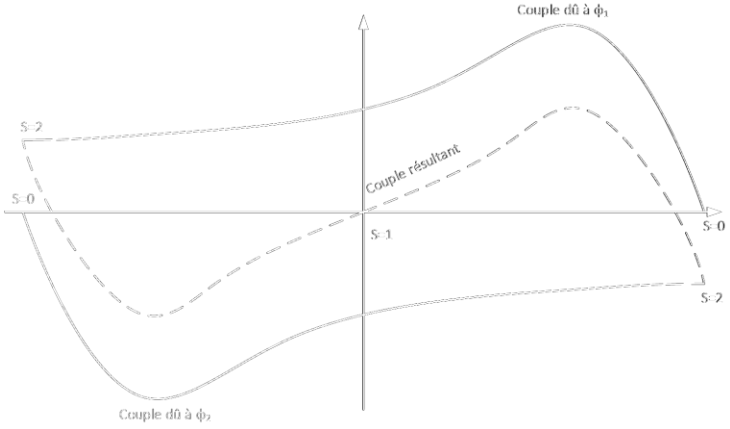
Moteurs monophasés

[Wildi : Chapitre 38]

38.4 Principe de fonctionnement

Une façon simplifiée de voir le fonctionnement du champ résultant est d'imaginer que le champ stationnaire et variable est la somme vectorielle de deux champs conjugués de longueur et vitesse constante.





Source : Wildi

Moteurs monophasés

[Wildi : Chapitre 38]

38.5 Démarrage par phase auxiliaire

Pour permettre le démarrage du moteur, on place sur le stator un enroulement auxiliaire. Cet enroulement est décalé de 90° électriquement par rapport à l'enroulement principal. L'enroulement auxiliaire est généralement débranché au moyen d'un interrupteur centrifuge qui s'ouvre dès que la vitesse du rotor atteint approximativement 75% de sa vitesse nominale.

Le flux de l'enroulement principal φ_s et le flux de l'enroulement auxiliaire φ_a sont déphasés l'un par rapport à l'autre résultant en un champ tournant. Le couple de démarrage est donné par :

$$\boxed{T = kI_aI_s \sin\alpha}$$

où T = couple de démarrage [N·m]

I_a = courant dans l'enroulement auxiliaire [A]

I_s = courant dans l'enroulement principal [A]

α = angle de déphasage entre I_s et I_a [°]

k = constante, dépendant de la construction du moteur

Source : Wildi

Moteurs monophasés

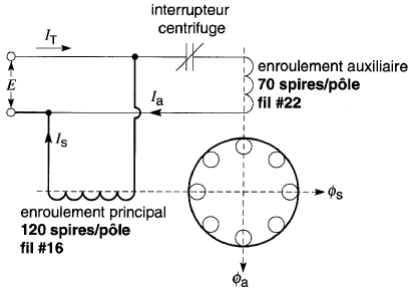
[Wildi : Chapitre 38]

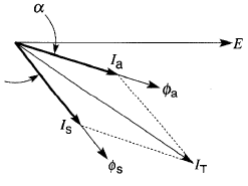
38.6 Moteur à phase auxiliaire résistive

Dans le moteur à phase auxiliaire résistive, l'enroulement principale comporte un nombre considérable de spires de gros fil. Donc, il a une réactance élevée et une résistance faible. Le courant I_s qui y circule est fortement en retard sur la tension E.

L'enroulement auxiliaire compte un nombre de spires moindre avec un fil plus petit. Sa réactance est alors plus faible et sa résistance plus élevée. Le courant I_a qui y circule est légèrement en retard sur la tension E.

Lorsque la vitesse de rotation atteint environ 75% de la vitesse synchrone, un interrupteur centrifuge coupe l'alimentation de l'enroulement auxiliaire. Cet enroulement doit être coupé pour éviter qu'il ne surchauffe dû à la densité de courant plus élevé.





Exemple 38-2

Exemple 38-3

Source : Wildi

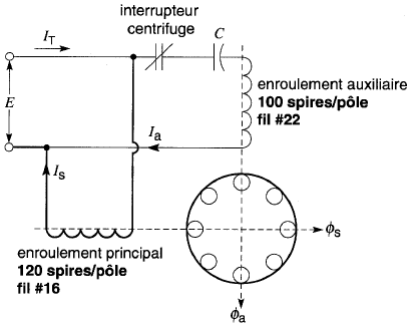
Moteurs monophasés

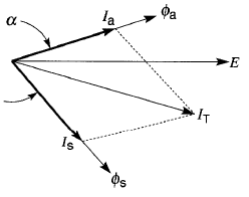
[Wildi : Chapitre 38]

38.7 Moteur à démarrage par condensateur

Dans le moteur à démarrage par condensateur ressemble au moteur à phase auxiliaire résistive. Cependant, l'enroulement auxiliaire a pratiquement autant de spires mais avec un fil plus petit que l'enroulement principal. De plus, un condensateur est connecté en série avec l'enroulement auxiliaire. La réactance capacitive du condensateur est choisie de façon que le courant I_a soit déphasé en avance sur la tension E.

Lorsque la vitesse de rotation atteint environ 75% de la vitesse synchrone, un interrupteur centrifuge coupe l'alimentation de l'enroulement auxiliaire. Cet enroulement doit être coupé pour éviter qu'il ne surchauffe dû à la densité de courant plus élevée.





Source : Wildi

73

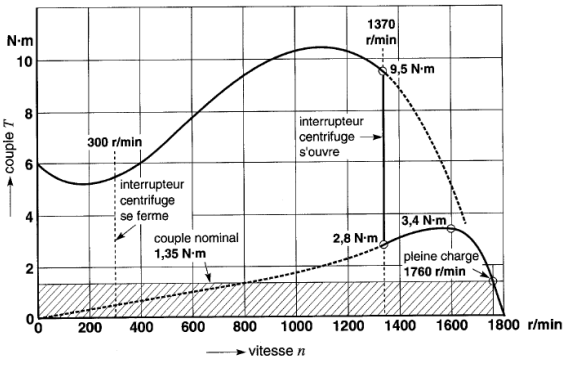
Moteurs monophasés

[Wildi : Chapitre 38]

38.8 Caractéristiques en charge des moteurs asynchrones

Le rendement et le facteur de puissance des moteurs asynchrones monophasés à puissance fractionnaire (de hp) est habituellement bas. Pour un moteur de 186 W (1/4 hp) à pleine charge, le rendement et le facteur de puissance sont de l'ordre de 60%.

En raison du courant d'excitation élevé, le courant à vide est compris entre 70% et 90% du courant de pleine charge.



Source : Wildi

Courbes de couple en fonction de la vitesse d'un moteur monophasé à démarrage par condensateur

74

Moteurs monophasés

[Wildi : Chapitre 38]

38.9 Vibration des moteurs monophasés

Du fait que le moteur monophasé reçoit une puissance électrique pulsative alors qu'il débite une puissance mécanique constante, il en résulte une vibration du moteur.

Source : Wildi

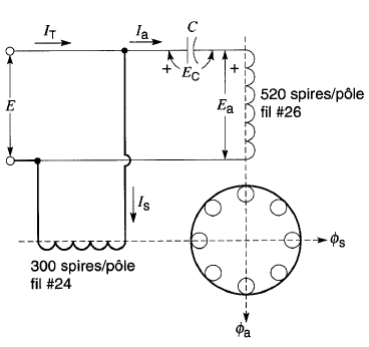
Moteurs monophasés

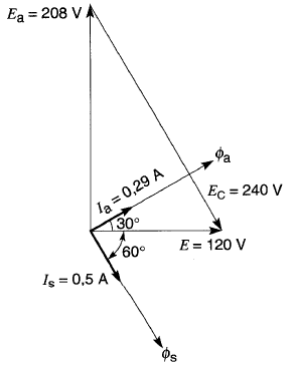
[Wildi : Chapitre 38]

38.10 Moteur à condensateur permanent

Le moteur à condensateur permanent est essentiellement un **moteur diphasé**. L'enroulement auxiliaire, aussi bien que la phase principale, reste alimentée par la source tant que le moteur est en marche. Par conséquent, pour ce type de moteur, la vibration qui caractérise les moteurs monophasés est éliminée lorsqu'il fonctionne à pleine charge.

On emploie ce moteur particulièrement silencieux dans les hôpitaux, les studios radiophoniques, etc., pour entraîner des charges constantes.





Source : Wildi

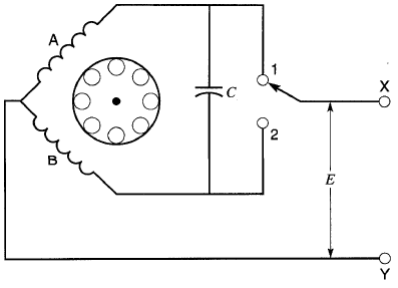
Moteurs monophasés

[Wildi : Chapitre 38]

38.11 Inversion du sens de rotation

Pour inverser le sens de rotation des moteurs monophasés on doit intervertir les bornes de l'enroulement principal ou de l'enroulement auxiliaire à l'arrêt lorsque le moteur compte un interrupteur centrifuge.

Dans le cas du moteur à condensateur permanent, on peut inverser le sens de rotation parce que les deux enroulements sont toujours en service. Un simple commutateur à 2 pôles permet de changer la rotation.



Source : Wildi

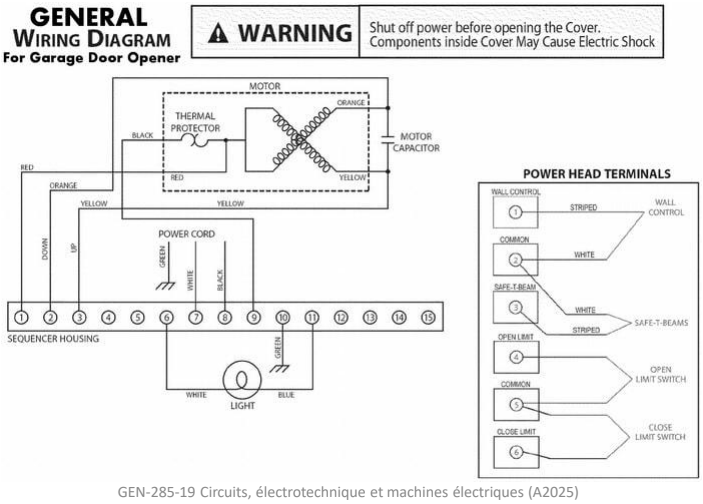
77

Moteurs monophasés

[Wildi : Chapitre 38]

38.11 Inversion du sens de rotation (suite)

Diagramme de branchement typique d'un moteur d'ouverture de porte de garage.



Source : Wildi

78

Moteurs monophasés

[Wildi : Chapitre 38]

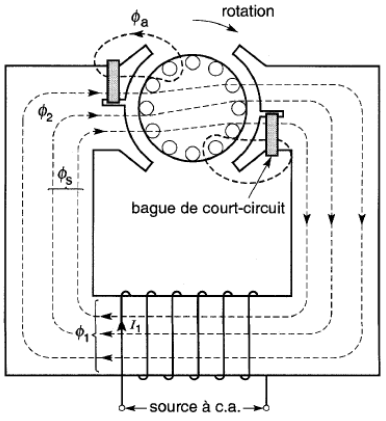
38.12 Moteur à bagues de court-circuit/déphasage (« Shaded-pole motor)

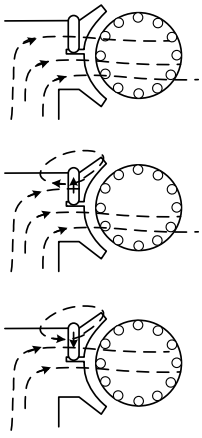
Ce type de moteur est très répandu pour des puissances inférieures à 50 W car il ne contient pas de phase auxiliaire conventionnelle. L'enroulement auxiliaire est constitué d'une seule spire de cuivre en court-circuit.

Le sens de rotation ne peut être changé.

Note : Des fois appelé par mauvaise traduction :
à pôles ou bagues écran, à pôles cachés

Exemple 38-4





Source : Wildi

Moteurs monophasés

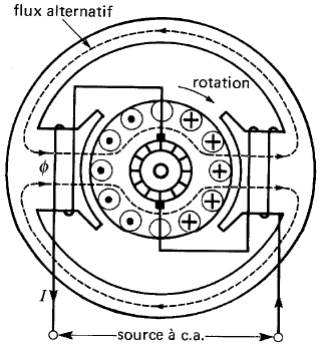
[Wildi : Chapitre 38]

38.13 Moteur série (moteur universel)

Le moteur série monophasé est du type à collecteur (pas d'induction). À l'exception du circuit magnétique qui est entièrement lamellé pour réduire les pertes par courants de Foucault, il est identique au moteur série à courant continu.

Quand une tension alternative est appliquée aux bornes du moteur série, le même courant circule dans l'induit et dans les pôles du moteur. Le courant d'induit de même que le flux produit par les pôles changent donc de sens périodiquement et simultanément. Le couple produit dans le rotor agit toujours dans le même sens.

Le principal avantage des moteurs série à puissance fractionnaire réside dans leur vitesse élevée. Toutefois son couple est faible.



Source : Wildi

Moteurs monophasés

[Wildi : Chapitre 38]

Problèmes

38-9

Source : Wildi